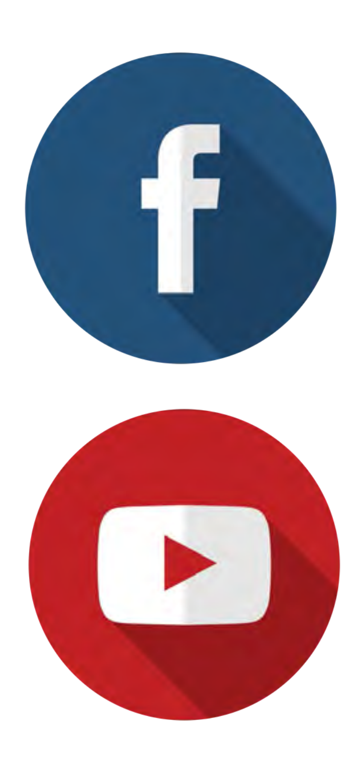
In the name of Allah, the Most Gracious, the Most Merciful







MUSCLE STRIE SQUELETTIQUE

Aspects mécaniques et énergétiques



Dr S. SAYAD

I/ Introduction / Généralités



❑ **Questions de départ**:

« Le mouvement … Oui; mais… Comment? »

Structures responsables?

Quels mécanismes nous font bouger?

Mouvement = Fonction de l'organisme permise par le système locomoteur (os, articulations et muscles); Sous le control étroit du système nerveux.

❑ **Qu'est ce qu'un muscle?** **Muscle= mot venant du latin signifiant « souris » (cf *Mus musculus)***

Muscle = Tissu, ensemble de cellules spécialisées dans la fonction motrice

C'est un tissu capable de générer une force et de la transmettre;

Génération de la force:

Système enzymatique + Appareil contractile ⟹ Conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique

Transmission de la force: Transmission de la force musculaire générée: une particularité du MSS.

NB/ il existe des systèmes de transduction chimio mécaniques dans les cellules non musculaires, mais sans transmission de la force(mouvements intracellulaires, déformations de la cellule, battements de cils…).

Organisation du muscle (niveaux cellulaire et tissulaire):

Contraction : Raccourcissement du muscle ou opposition à son allongement;

=mise en route des sites générateurs de force: les ponts transversaux (lien entre la myosine et l'actine)

❑ **Motricité/ Muscle:**

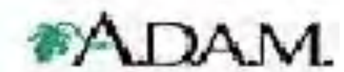
- **La motricité somatique regroupe l'ensemble des fonctions qui permettent à un organisme de se déplacer ou d'interagir avec son milieu en mobilisant des pièces squelettiques;**
- L'organe effecteur de la motricité somatique est le **muscle strié squelettique**
- C'est un organe dont la fonction première est de fournir un travail mécanique en consommant de l'énergie qu'il puise dans son métabolisme cellulaire

II/ les différents types de muscle

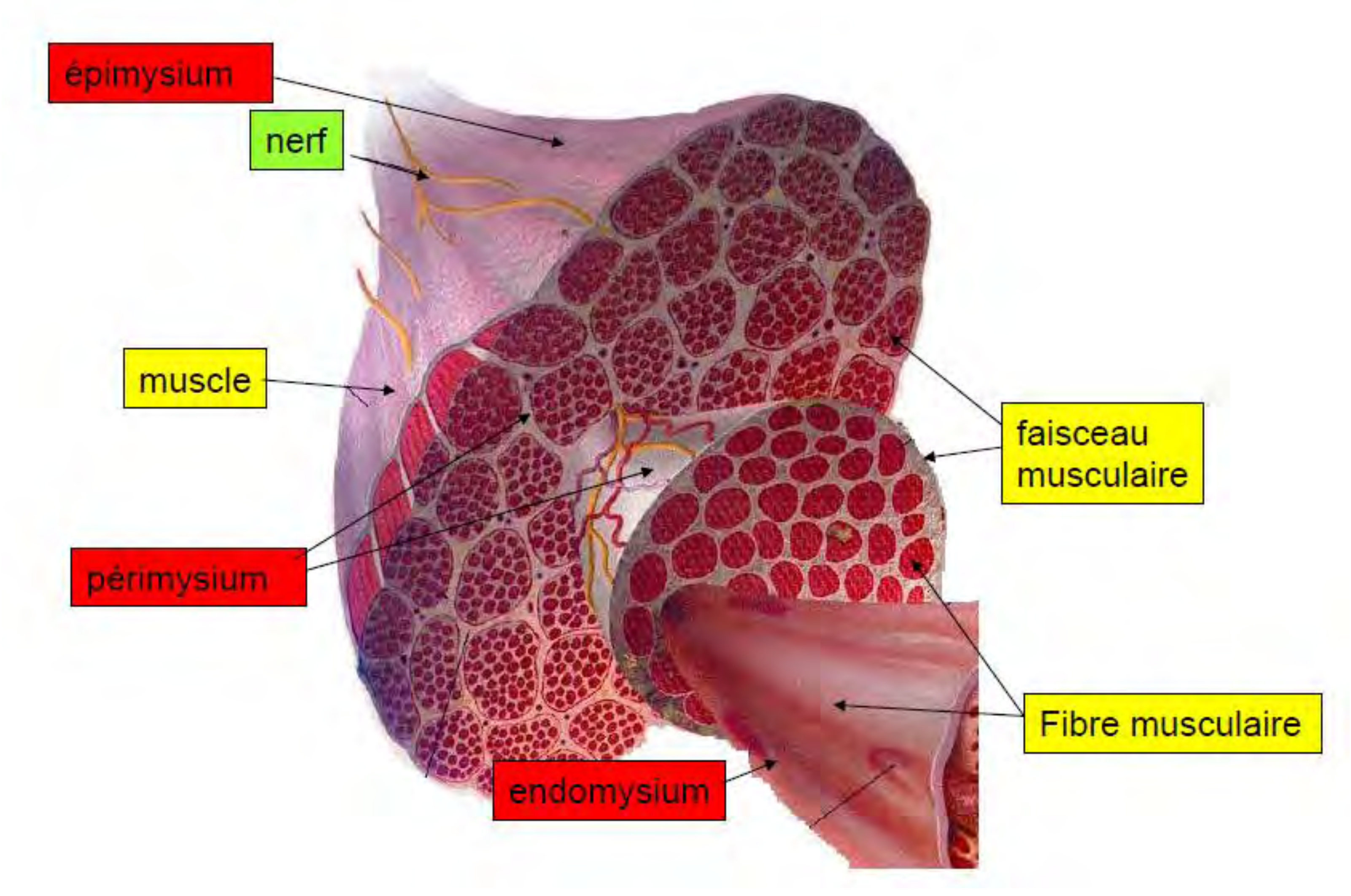
Cellule musculaire cardiaque

Cellule musculaire squelettique

Cellule musculaire lisse



Membranes musculaires



A/ Comment peut-on classer les différents types de muscles ?

critères possibles:

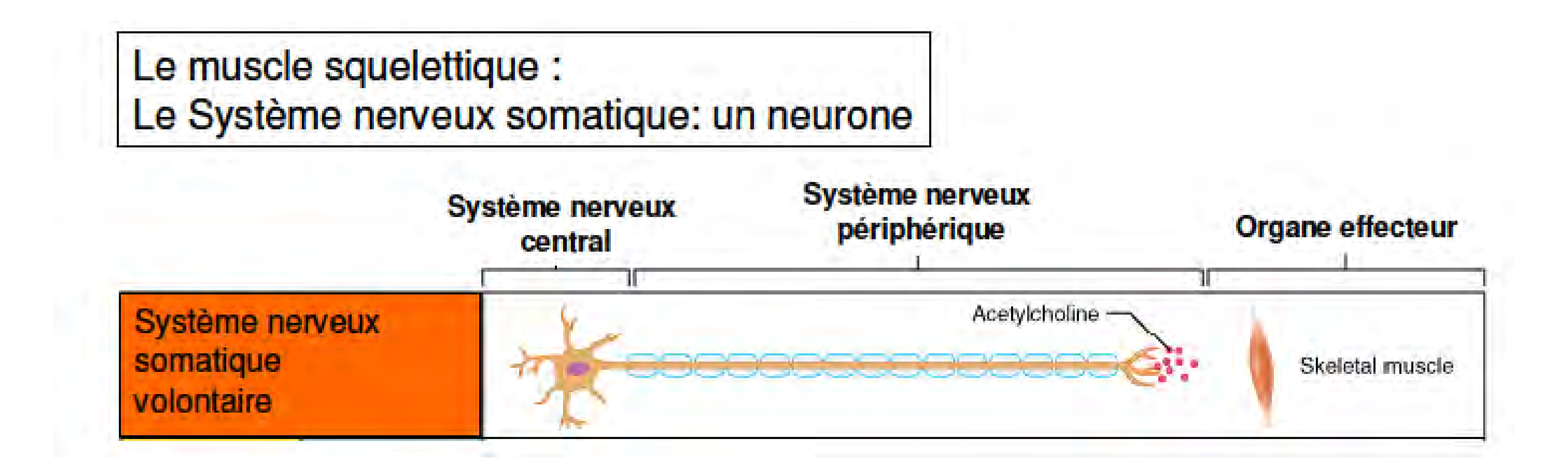
- organisation interne de la cellule musculaire
- organisation du tissu musculaire
- contrôle de l'activité musculaire par le système nerveux

Le muscle strié squelettique:

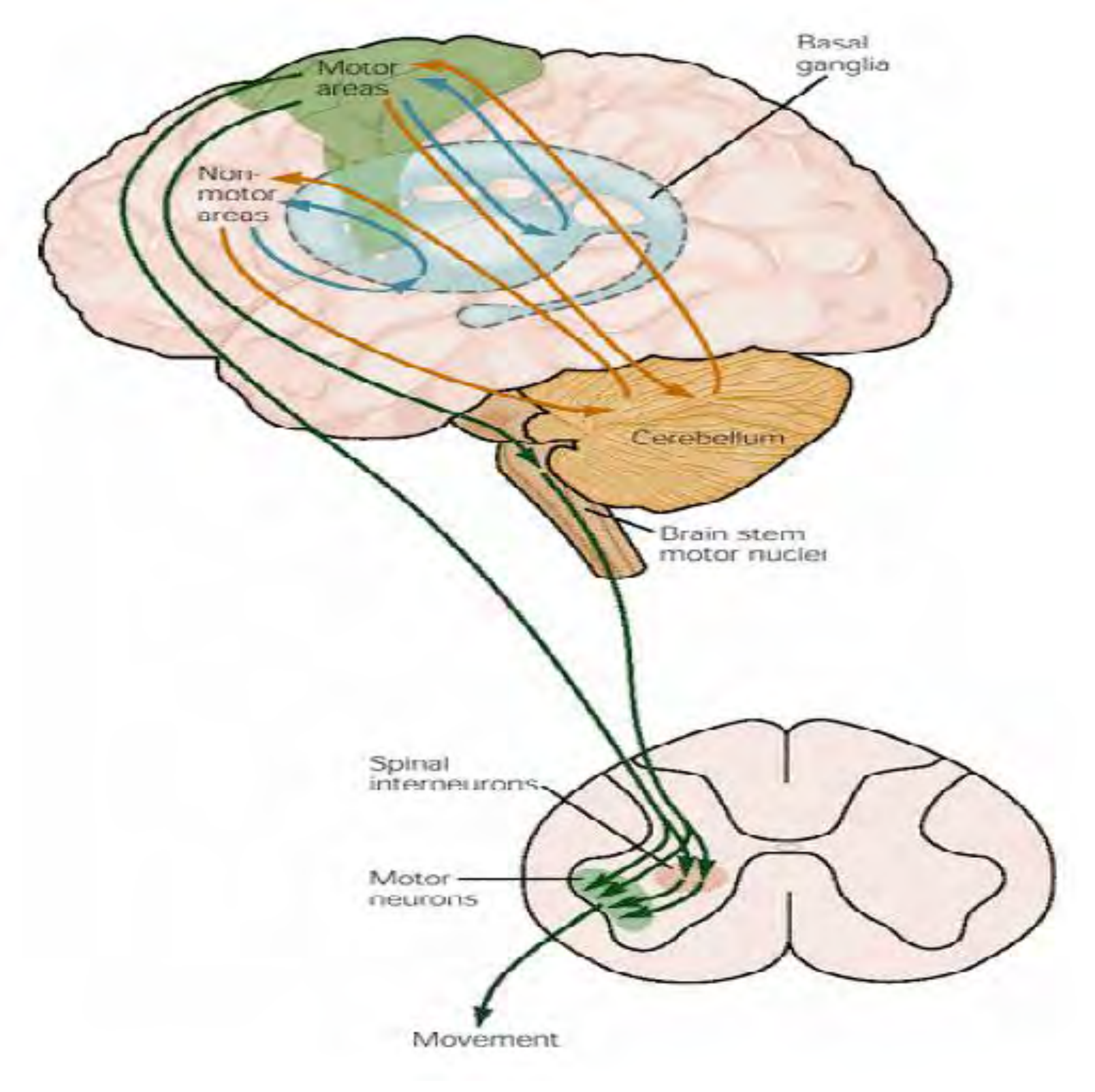
Constitué de cellules appelées cellules musculaires squelettiques ou fibres musculaires

- ✓ Ils recouvrent le squelette osseux et s'y attachent (d'où le nom)
- ✓ Très longues cellules(plusieurs cm); diamètre: 10 à 100 µm
- ✓ Cellules polynucléés + réseau protéique important
- ✓ Membrane cellulaire = sarcolemme
- ✓ Muscle strié :(unité contractile=sarcomère)
- ✓ innervé par le système nerveux somatique.
- ✓ Contrôle volontaire muscles volontaires
- ✓ Contrôle réflexe.
- ✓ se fatiguent facilement.
- ✓ capables d'exercer une force considérable.

Régulation par le système nerveux



Structures impliquées



B/ Fonctions essentielles

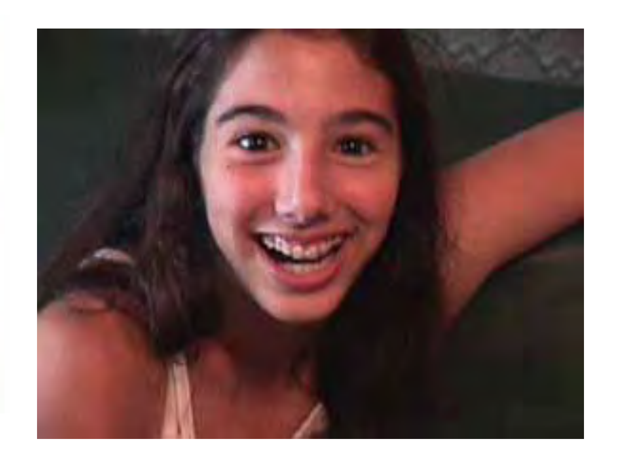
trois fonctions essentielles :

- mouvement
- stabilisation des positions du corps
- génération de chaleur: thermogenèse (frissons).

Les muscles squelettiques assurent trois fonctions importantes:

1/ ils permettent les mouvements (mobilité corporelle, mobilité des yeux, expression du visage...)

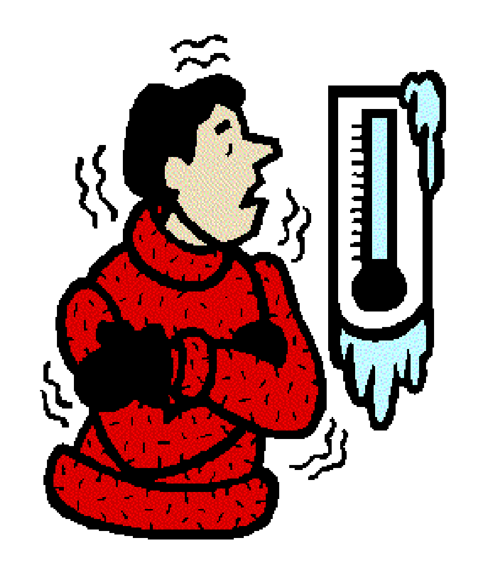




2/ ils permettent de maintenir une posture



3/ ils participent à la régulation de la Température corporelle grâce à leur masse importante



C/ Propriétés essentielles

- **Excitabilité :**

  Faculté de percevoir un stimulus et d ’émettre un signal électrique : potentiel d’action.

  Le stimulus physiologique est de nature chimique (neurotransmetteur).

  Le potentiel d’action déclenche la contraction.

- **Elasticité :** L'élasticité est la propriété d'un corps, d'une structure de se déformer sous l'influence d'une (de) force(s) extérieure(s) puis de reprendre sa forme initiale quand la (les) contrainte(s) cesse(nt).

- **Tonicité :** capacité à garder un état certain de contraction même au repos.

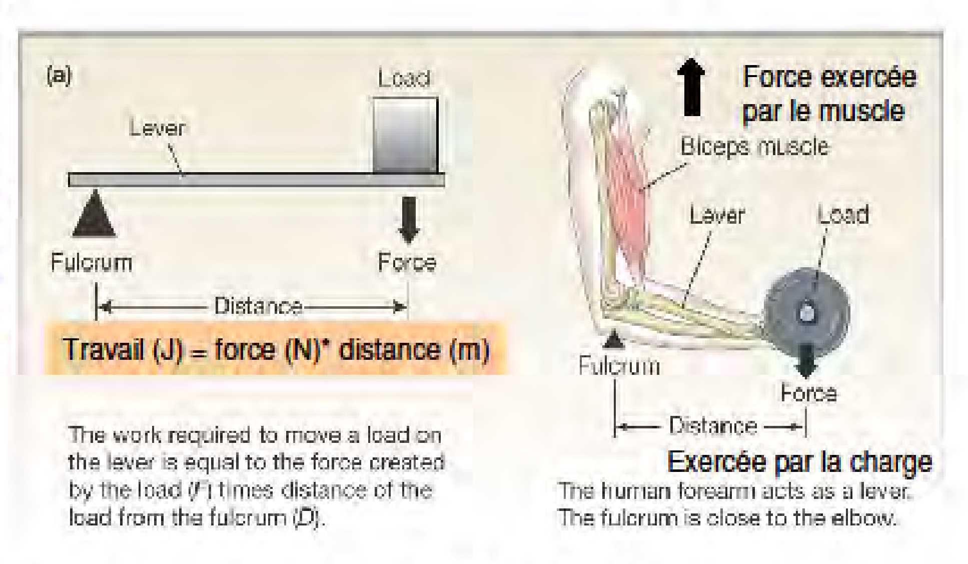
- **Contractilité :** La contractilité est la capacité du muscle à se contracter puis à retrouver son état d'origine. Cette « contraction » se traduit par un raccourcissement et/ou un développement de force.

III/ Biomécanique – Principe du levier

Le principe du levier:

Un levier est une barre rigide
1°) se déplaçant autour d'un point fixe , le point d'appui (pivot, fulcrum)
2°) soumise à l'action de forces

Quand la force exercée par le muscle est supérieure à la force exercée par la charge il y a raccourcissement musculaire et mouvement.



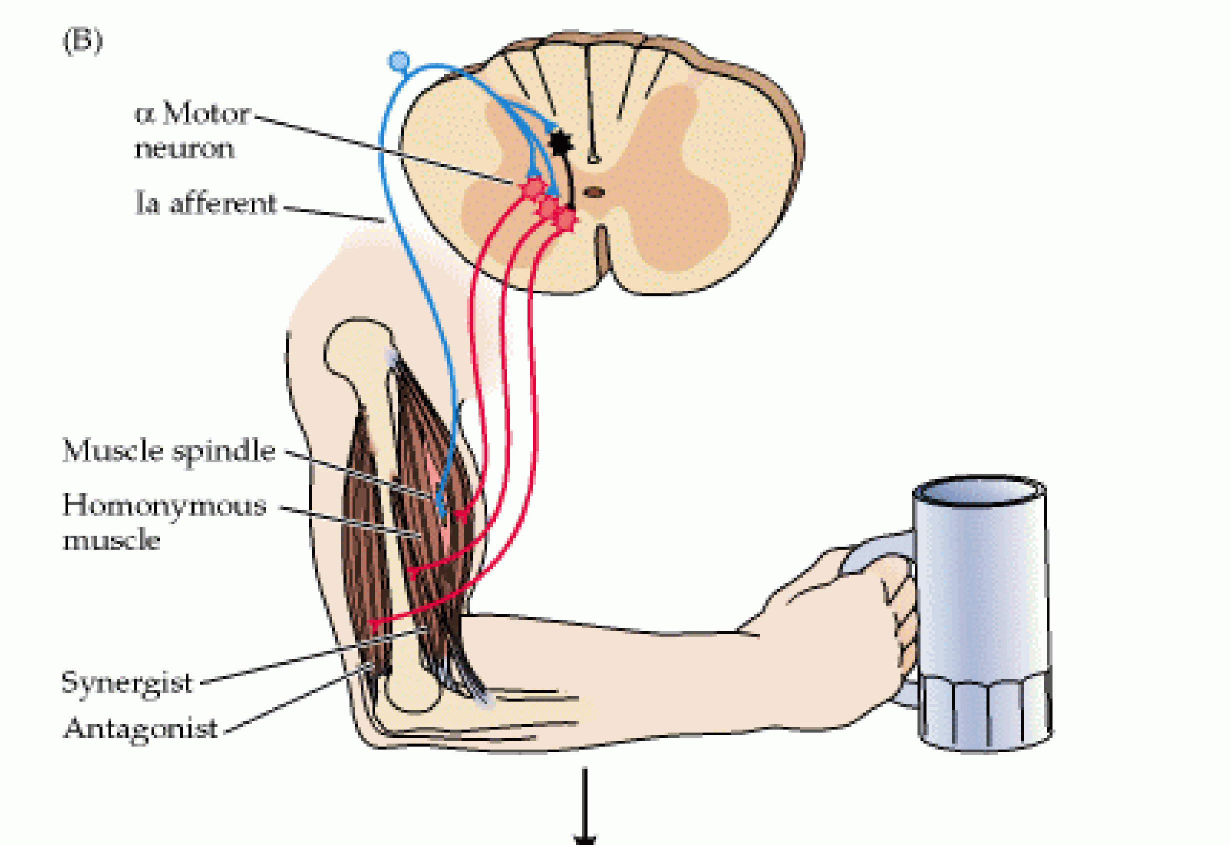
Fulcrum: point d'appui. Load : charge

Il existe d'autres types de leviers.

III/Biomécanique: principe du levier

Le mouvement autour d'un axe dépend de la mise en jeu réciproque de muscles agonistes et antagonistes :

Exemple flexion de l'avant-bras: contraction du biceps et relâchement du triceps

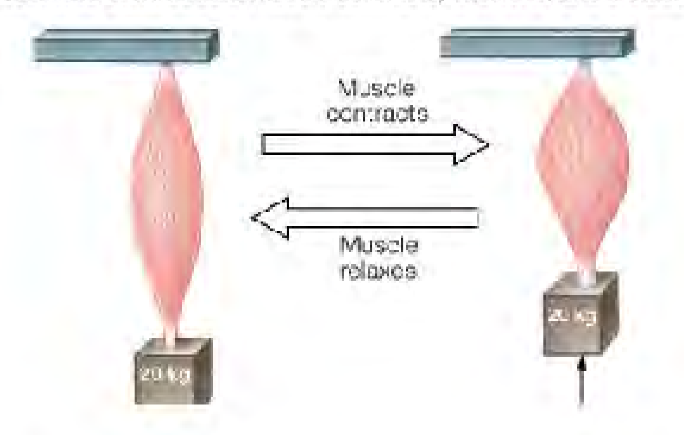


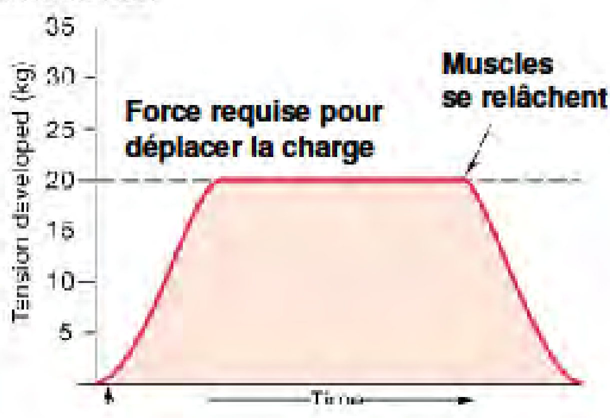
III/Biomécanique: Contraction isotonique ou isométrique

Mouve

III/ Biomécanique: contraction isotonique ou (anisométrique)

(a) **Isotonic contraction:** muscle contracts, shortens, and creates enough force to move the load.





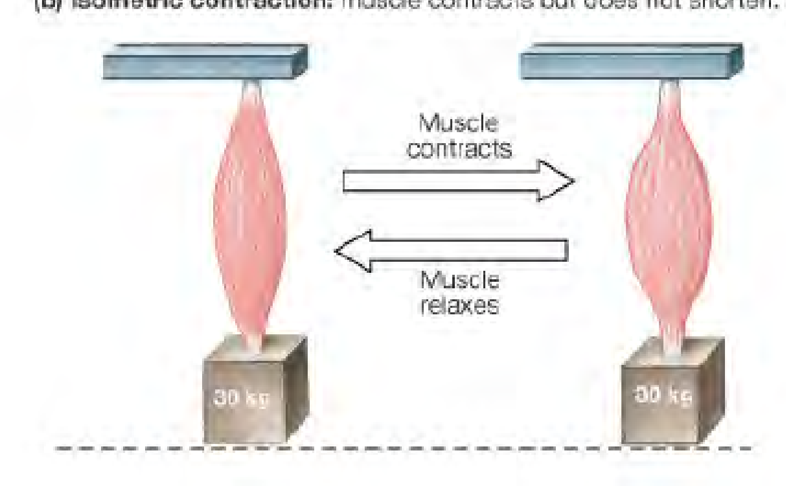
On l'obtient en faisant soulever un poids au muscle

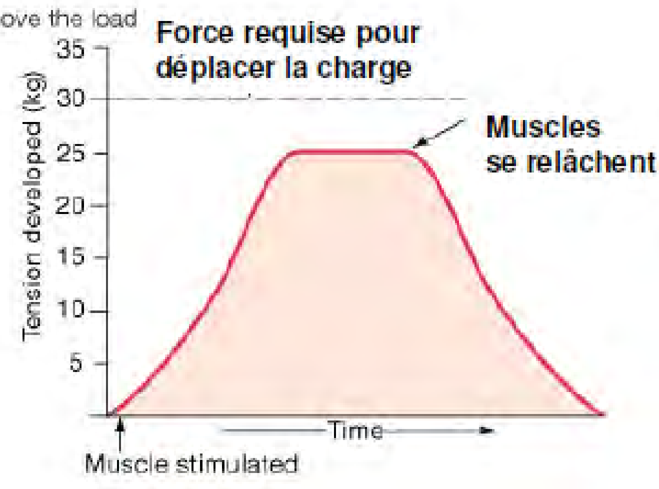
Contraction dans laquelle le muscle se raccourcit.

La tension (proportionnelle à la charge) reste pratiquement constante. Plus la masse M est petite, plus le raccourcissement peut être important.

Lorsque la masse est plus grande que la capacité de contraction du muscle, on ne peut la soulever et on se retrouve alors en contraction isométrique.

III/ Biomécanique: contraction isométrique





La longueur du muscle est gardée constante et à mesure que le niveau de contraction augmente et que la tension développée augmente.

Contraction musculaire sans raccourcissement.

PROPRIETES MECANIQUE

❑**Au Repos**: La principale propriété du muscle au repos est son:

-Élasticité: soumis à une force qui tend à l'étirer , un muscle résiste avec une force croissante au fur et à mesure de son étirement;

il retrouve sa longueur initiale lorsque la force qui tend à l'étirer cesse.(due à la présence de composantes élastiques en série, en parallèles et à la machine protéique contractile).

-Plasticité:

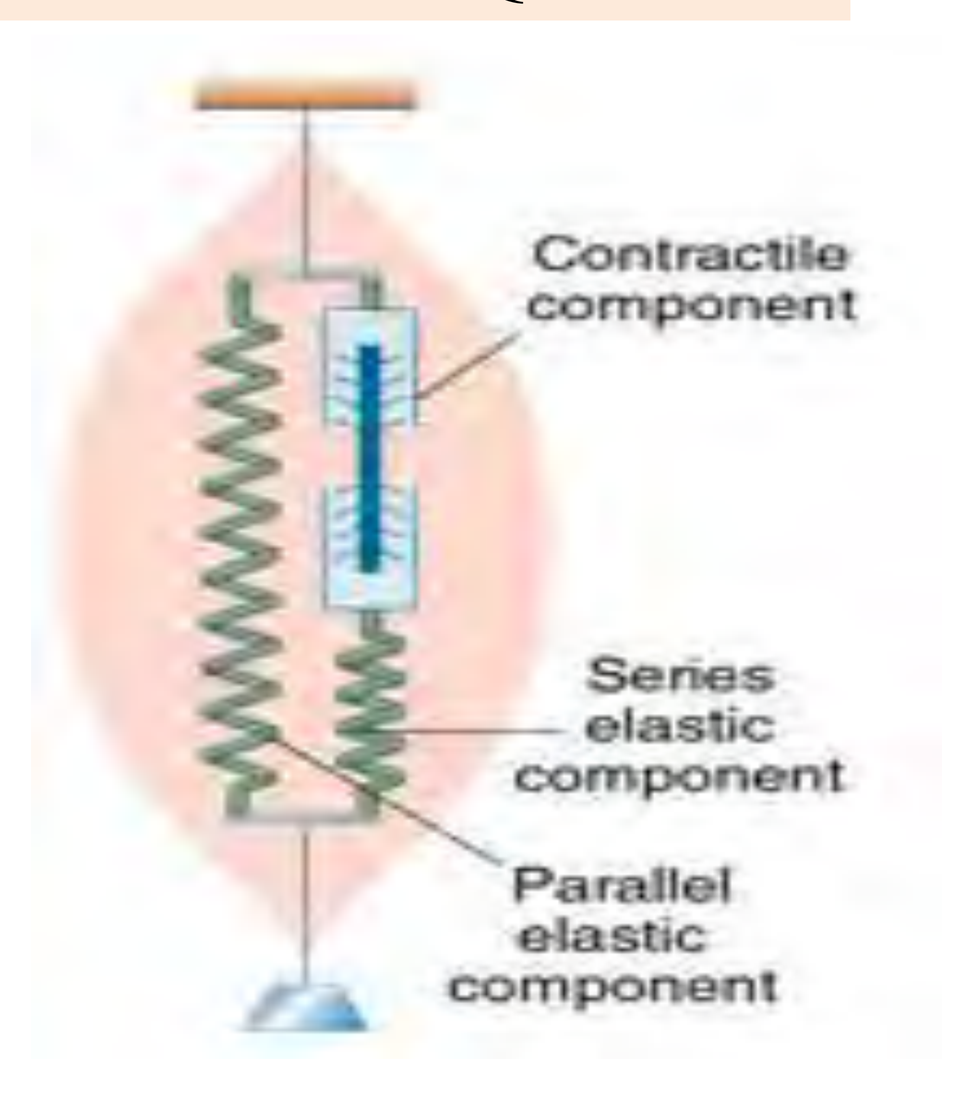
Elle due aux composantes contractiles (structure de type viscoplastique):

- le tissu musculaire subit des transformations en réponses à des sollicitations physiologiques ou pathologiques, s'adapte à des situations fonctionnelles et à des agressions accidentelles ou à des défauts génétiques;
- Il génère de la force, résiste à la fatigue, et répond à l'entrainnabilité.

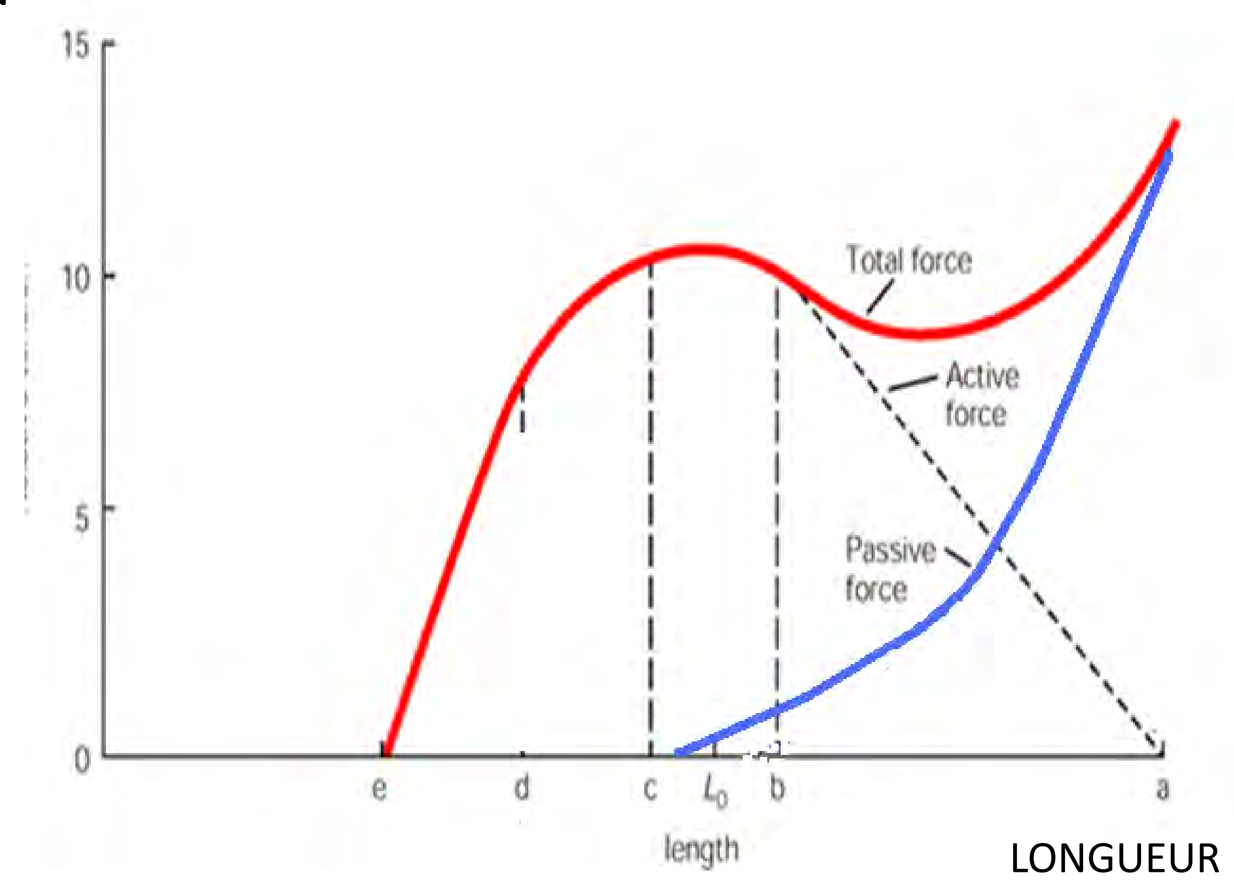
PROPRIETES MECANIQUES

Modèle mécanique de Hill

- composante élastiques en séries :tendons ,lignes Z etc.
- Composantes élastiques en parallèles: sarcolemme , réticulum sarcoplasmique ,tissu conjonctif …
- Composantes contractiles: myofibrilles



ELASTICITE


TENSION
15
10
5
0
Total force
Active
force
Passive
force
e
d
c
L_0
b
a
length
LONGUEUR

PROPRIETES MECANIQUE

- Notion de longueur de repos (naturelle) un muscle au repos, dans les conditions physiologiques présente une longueur correspondant à la longueur de repos.

- Notion de longueur d'équilibre : lorsqu'on sectionne une extrémité tendineuse d'un muscle à sa longueur de repos il a tendance à se raccourcir cette nouvelle longueur porte le non de longueur d'équilibre (20% plus court que L Repos)

- Notion de précharge : tension (correspond à la charge nécessaire pour maintenir le muscle à sa longueur de repos)

PROPRIETES MECANIQUE

❑EN ACTIVITE

La réponse mécanique d'une fibre musculaire à un seul potentiel d'action est appelée

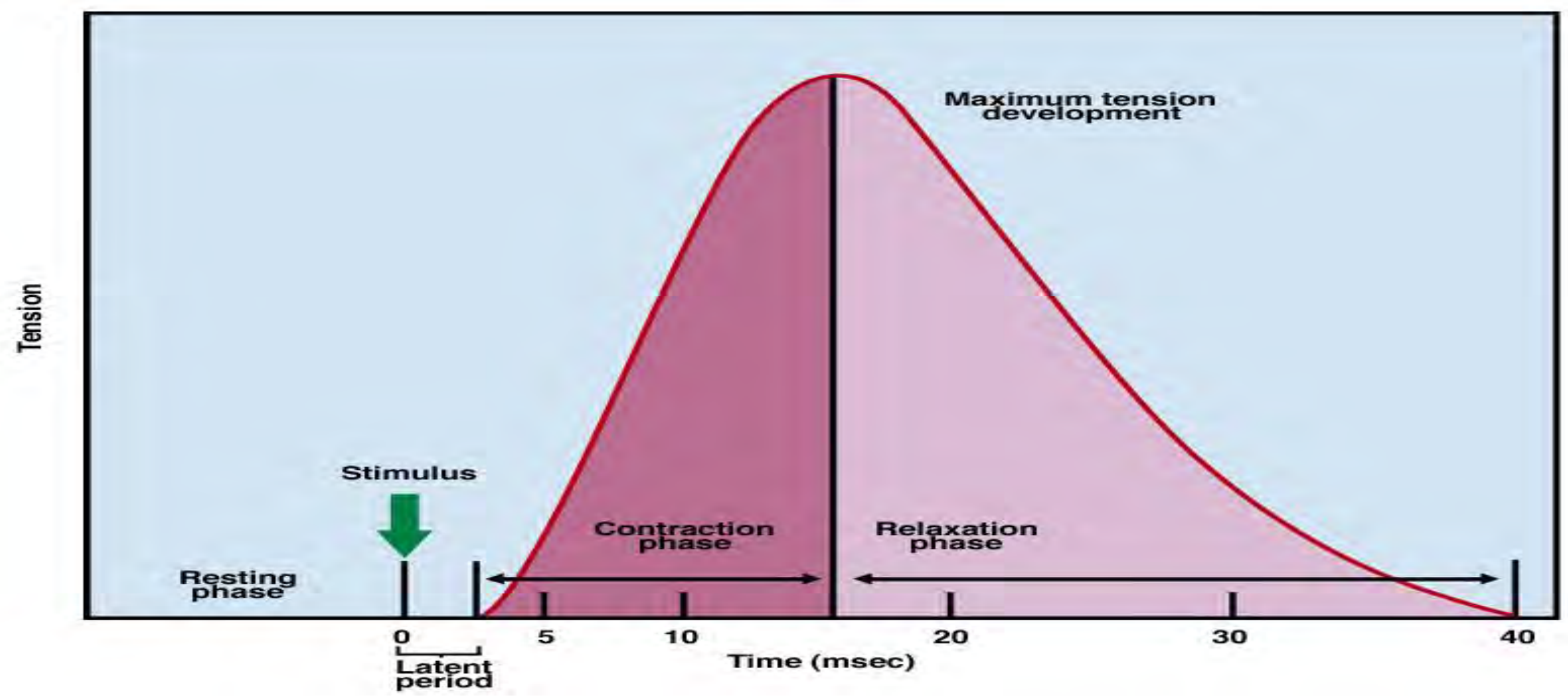
1/SECOUSSE MUSCULAIRE : contraction brève du muscle à la suite d'une stimulation unique supraliminaire qui peut être divisée en différentes phases :

SECOUSSE MUSCULAIRE

1 Latence : couplage excitation contraction….

2 Phase de contraction: développement de la tension active

3 Phase de décontraction: relâchement du muscle (4X plus long que phase 2)



Secousse musculaire

-Variante :

Fatigue : allongement de la décontraction

Froid : augmentation de la durée de la contraction et de la décontraction

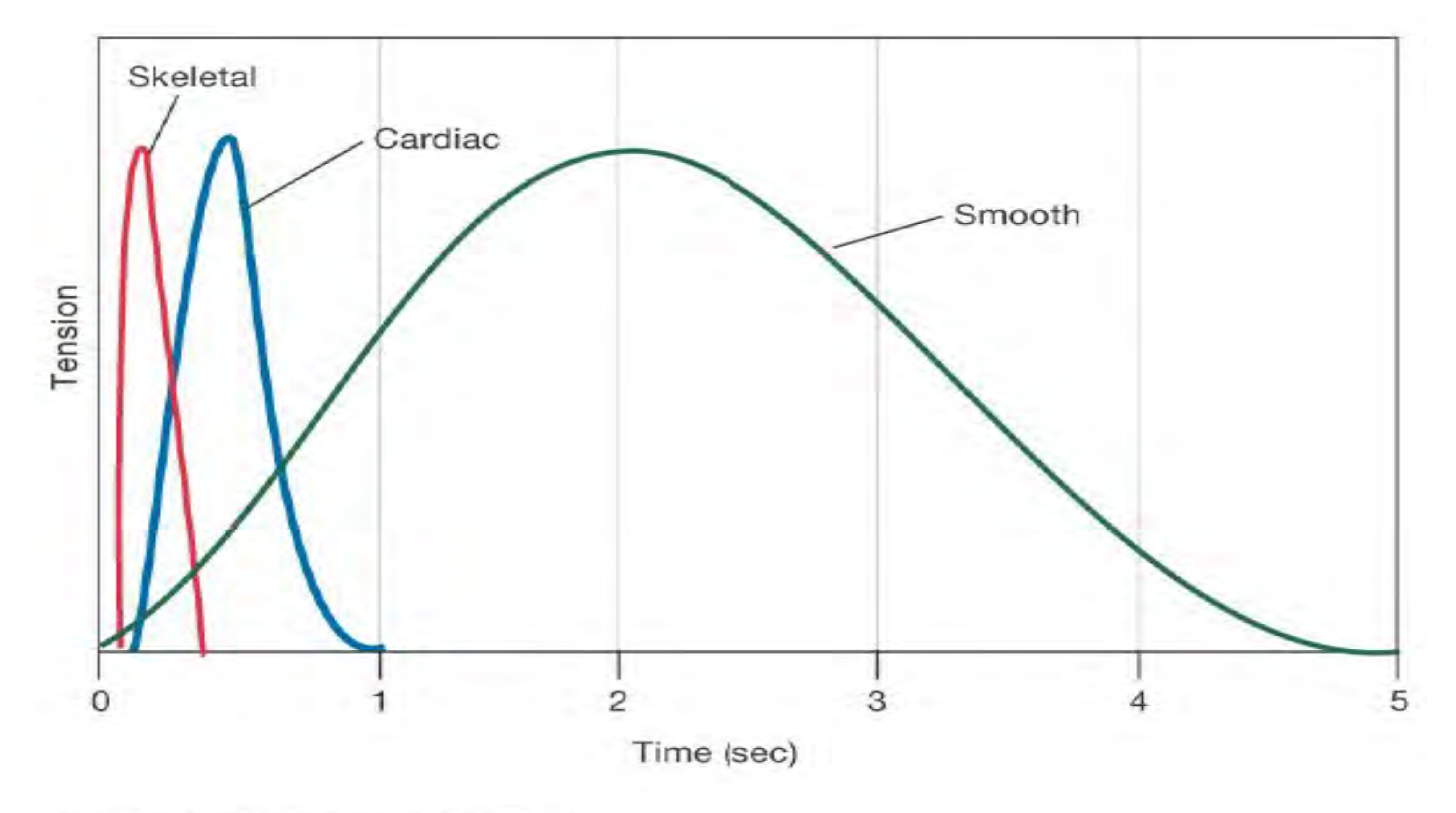
- Durée

Muscles rapides (oculomoteur) : 7 à10 msec

Muscles lents (soléaire) 90 à 120 msec

- Autres.

COMPARAISON SUR LA DUREE DE LA CONTRACTION MUSCULAIRE AU NIVEAU DES TROIS TYPE DE MUSCLES



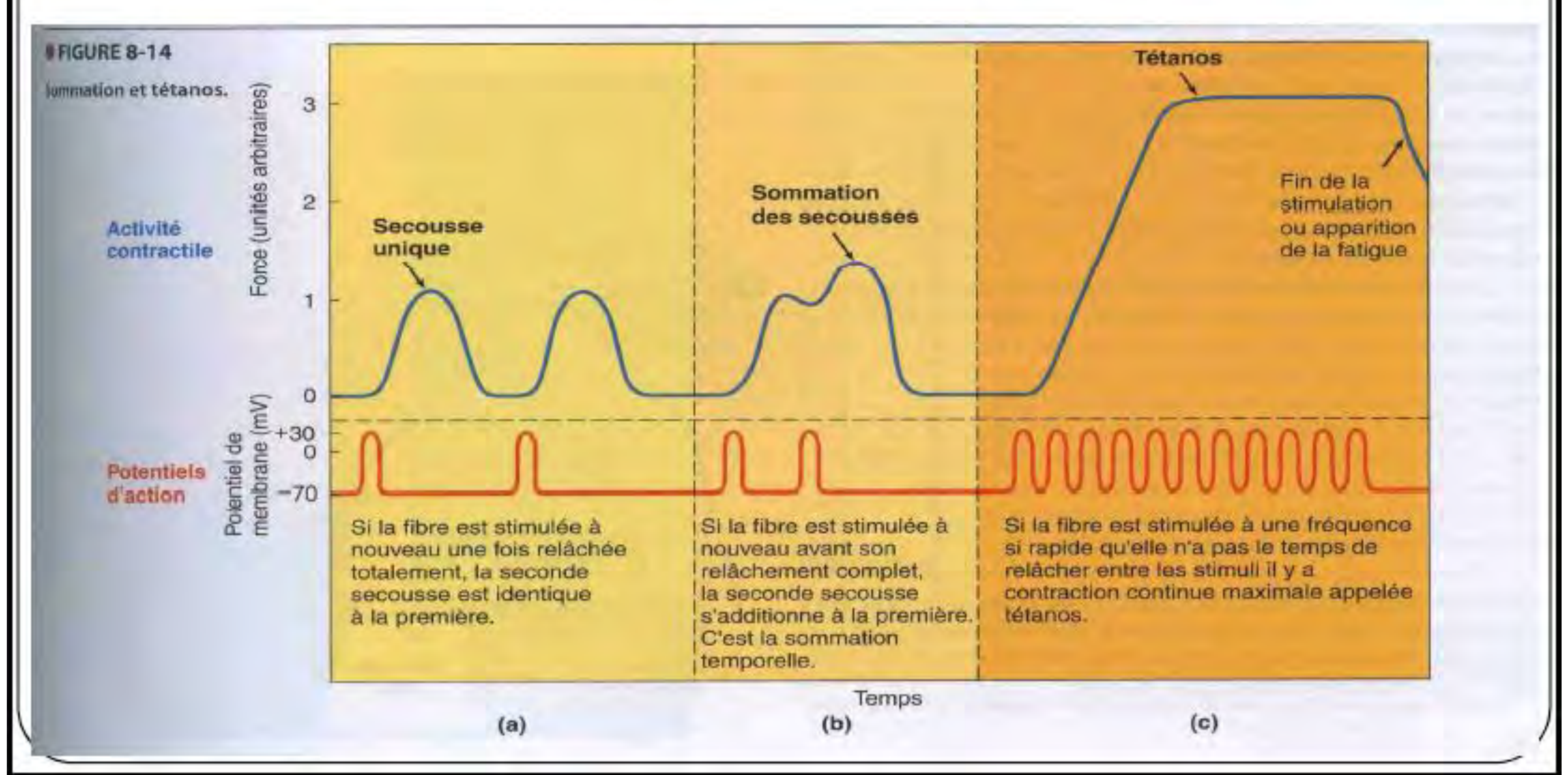
2/Le tétanos:

- Si les fibres musculaires répondent à la loi de tout ou rien, cela ne les empêche pas de présenter des phénomènes **de fusion mécanique des secousses.**
- Lors d'une contraction tétanique, la tension développée par le muscle est plus importante. ceci est du à des phénomènes de recrutement spatial et à une très grande possibilité de création de ponts d'acto-myosine.
- La tension maximale développé par un muscle a lieu en contraction isométrique

Sommation temporelle et tétanos

- Si 2 stimulations identiques sont appliqués à un muscle dans un court intervalle la seconde contraction sera plus ample que la première ➡ sommation temporelle.

⬆ la fréquence de stimulation ➡ la période de relaxation entre les contractions devient de plus en plus courte ➡ la sommation de plus en plus importante ➡ les contractions fusionnent en une longue contraction régulière ➡ **tétanos**



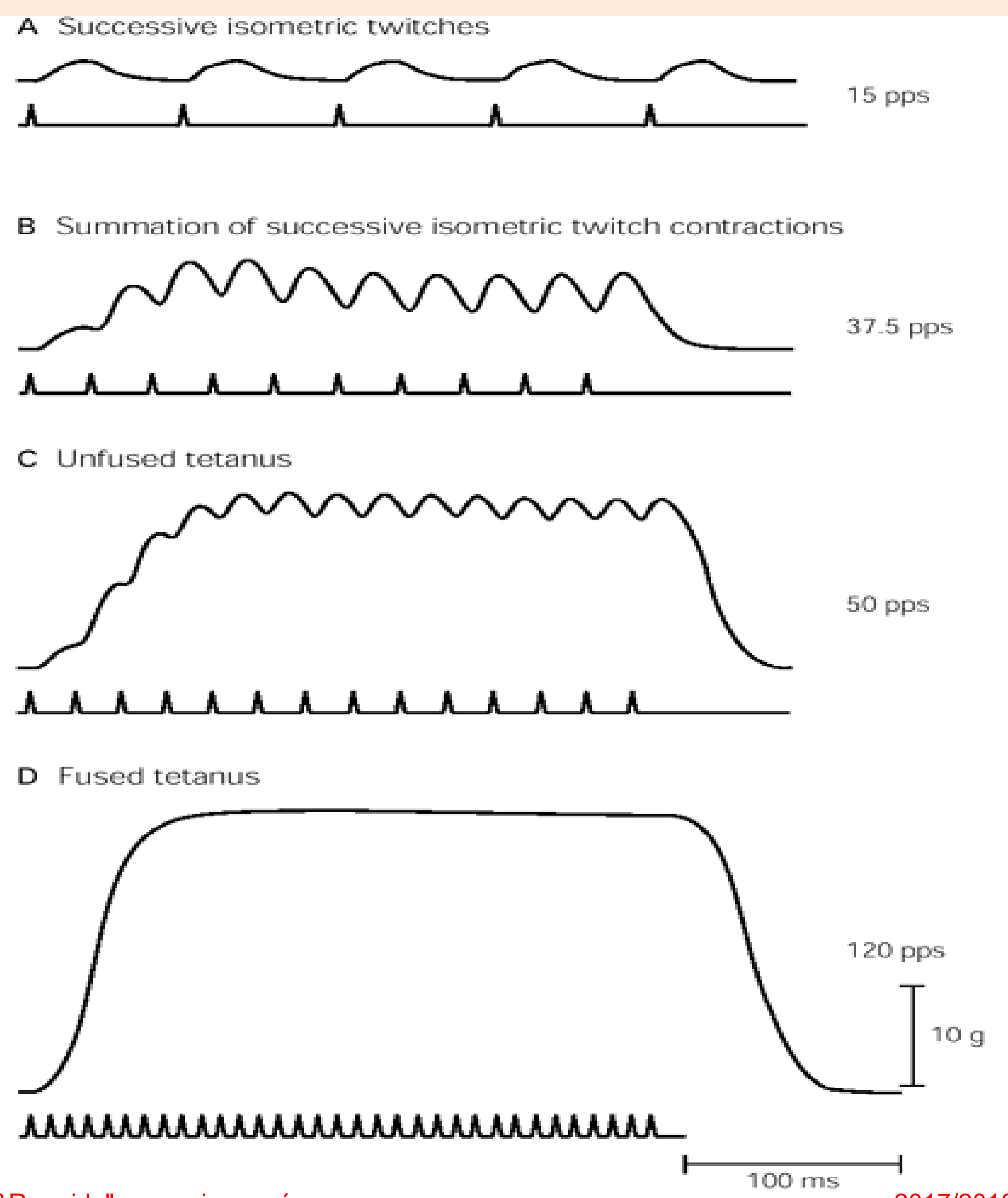
Sommation et tétanos

Principles of Neural Science **Eric R. Kandel** et al 4eme édition

-A HAUTE FREQUENCE : fusion des secousses tétanos isométrique ou isotonique

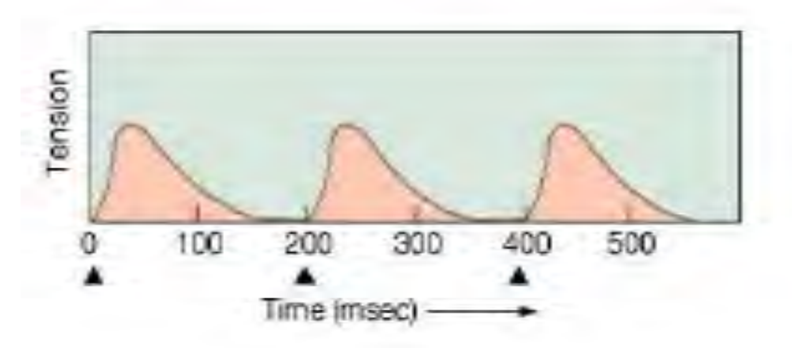
-FUSION TOTALE DES SECOUSSES (physiologique) variable selon les fibres 30 pps pour le soléaire 300 pps pour le muscle oculomoteur

-FORCE DE CONTRACTION environ 4x plus importante

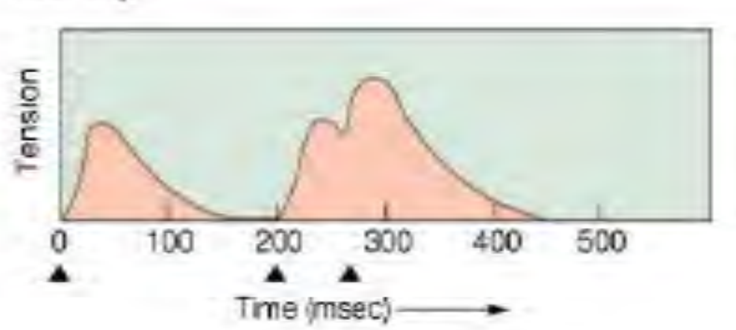


Sommation et tétanos

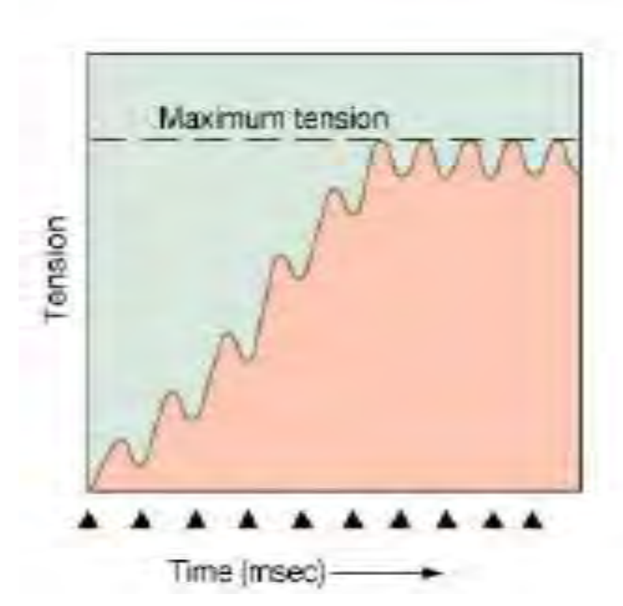
(a) Single twitches: Muscle relaxes completely between stimuli (▲).



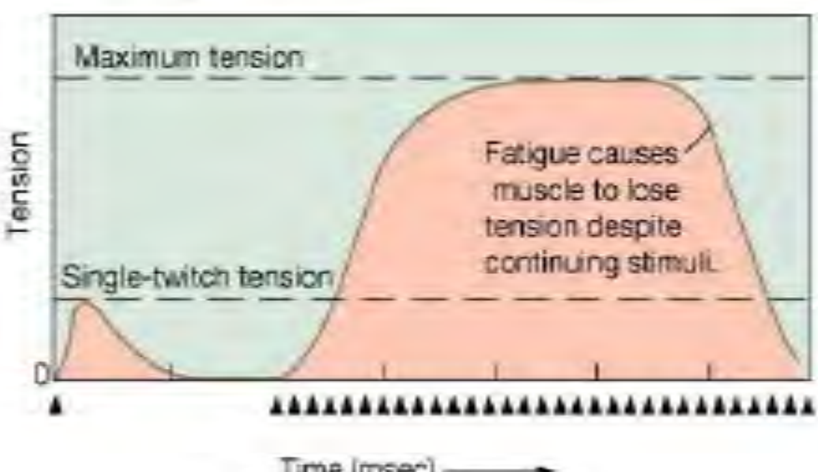
(b) Summation: Stimuli closer together do not allow muscle to relax fully.



(c) Summation leading to unfused tetanus: Stimuli are far enough apart to allow muscle to relax slightly between stimuli.



(d) Summation leading to complete tetanus: Muscle reaches steady tension.



3/ Différents types de fibres musculaires squelettiques

- Il y a trois types de fibres musculaires:

- **Fibres lentes**: de couleur rouge, fréquence de fusion basse, la tension active est basse.

- **Fibres rapides**: fatigables de couleur blanche, le temps de contraction est court, la force développée est augmentée

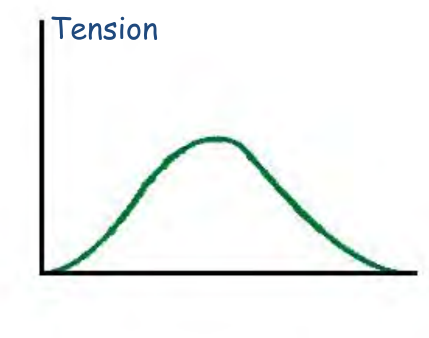
- **Fibres intermédiaire**: fibres rapides et résistantes, elles sont pales, la fréquence de fusion développée est intermédiaire, la force développée est moyenne, leur fatigabilité est médiane

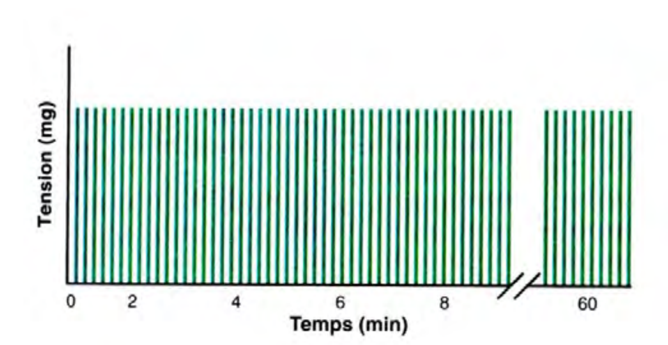
3/ Différents types de fibres musculaires squelettiques

secousse unique

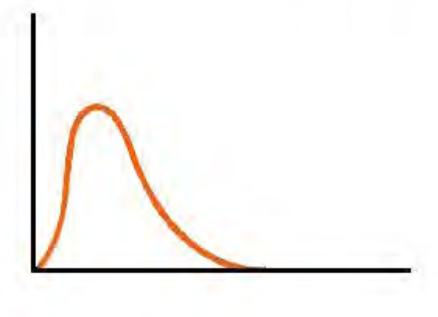


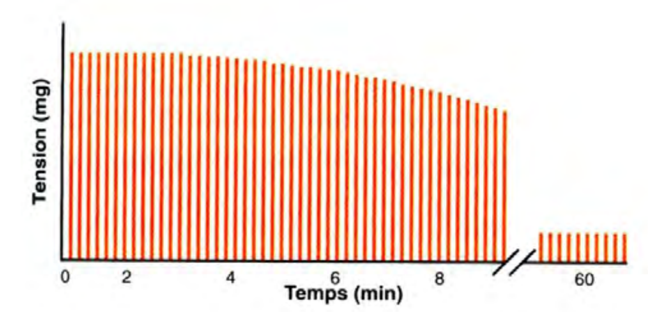




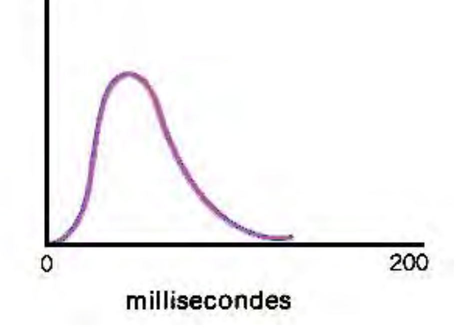


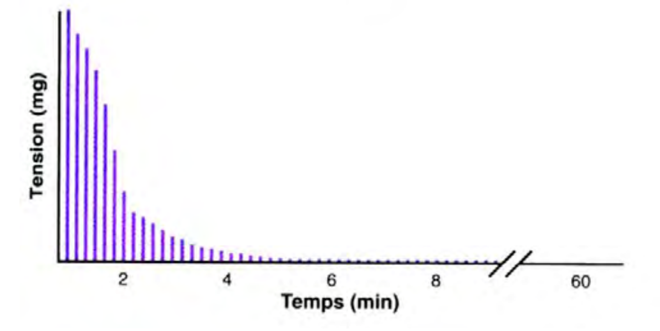
Fibres rapides mixtes (IIA)





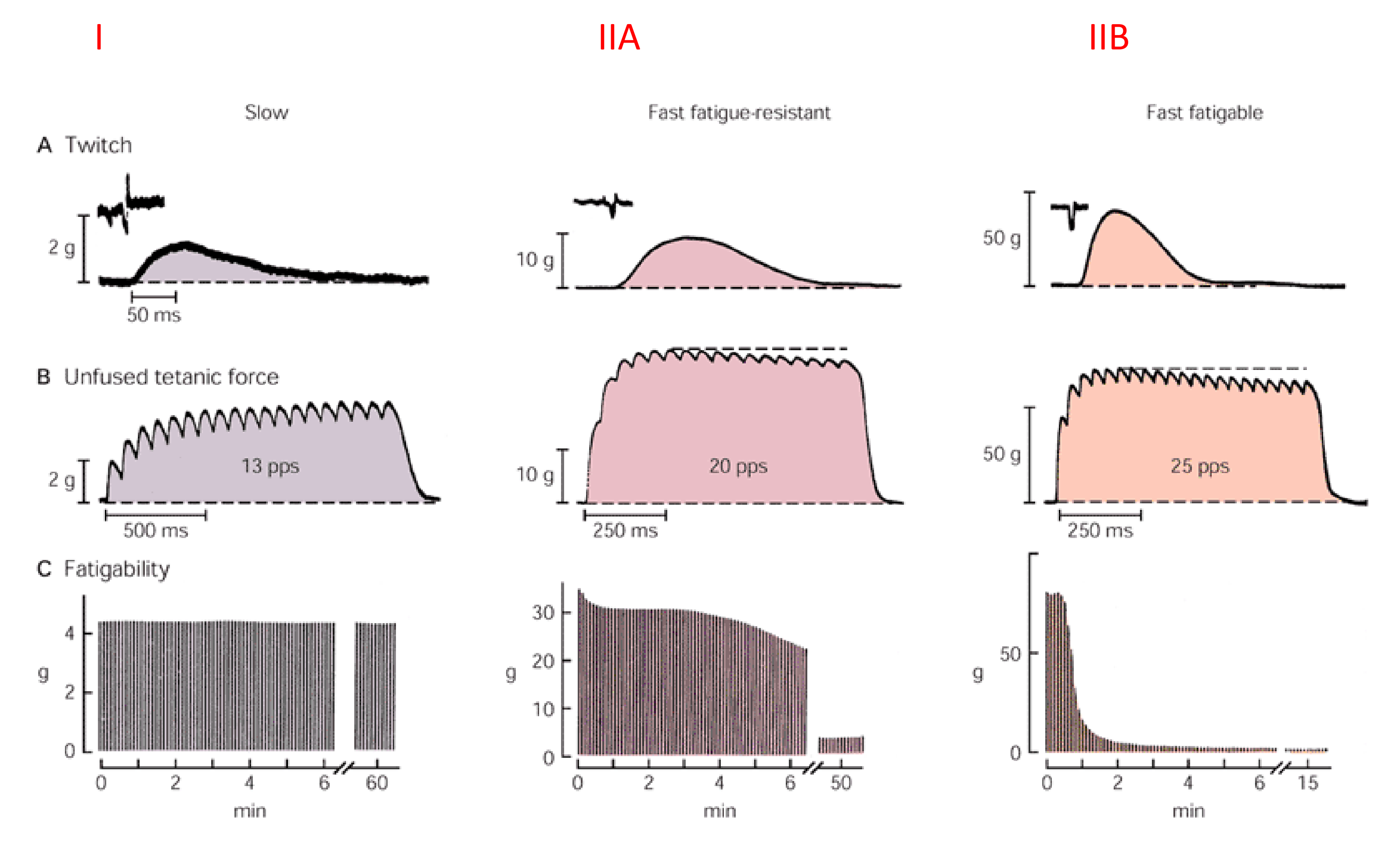
Fibres rapides glycolytiques (IIB)





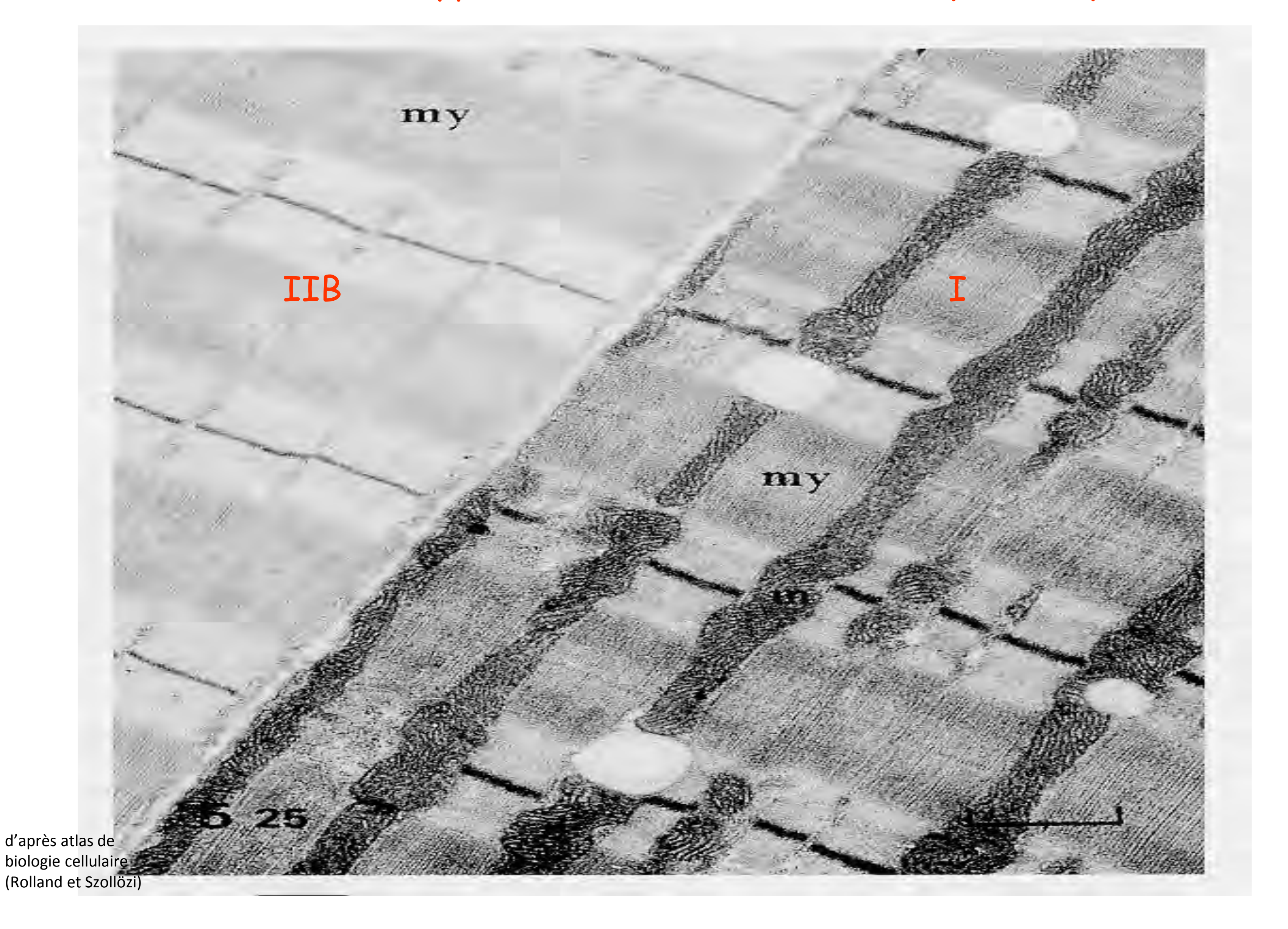
d'après Vander et coll.
Physiologie humaine, Maloine

DIFFERENTS TYPE DE FIBRES MUSCULAIRES STRIEES SQUELETTIQUE



Principles of Neural Science
Eric R. Kandel et al 4eme édition

Différents types de fibres musculaires squelettiques



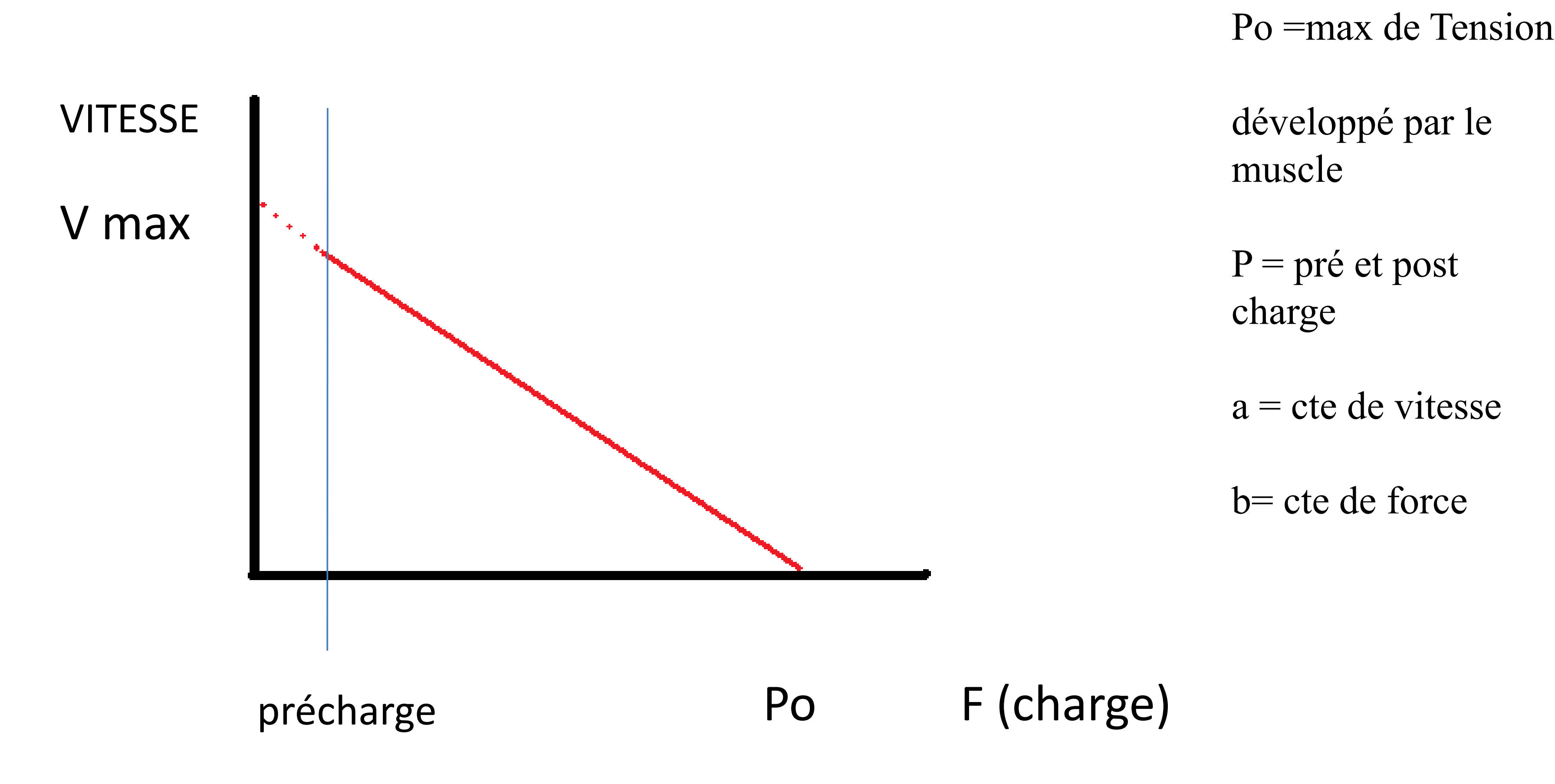
d'après atlas de biologie cellulaire (Rolland et Szollözi)

Différents types de fibres musculaires squelettiques

	Lentes oxydatives (I)	Rapides mixtes (IIA)	rapides glycolytiques (IIB)
contraction	lente	rapide	rapide
fatigue	tardive	intermédiaire	précoce
métabolisme anaérobie	+	++	+++
diamètre des fibres	faible	moyen	élevé
métabolisme aérobie	+++	++	+
mitochondries	+++	+	(0)
myoglobine	+++	++	+
couleur du muscle	rouge	intermédiaire	pâle
vascularisation	+++	++	+
lipides	+++	++	+

IV/ -RELATION FORCE –VITESSE

On peut étudier la vitesse de contraction d'un muscle en fonction d'une charge appliquée en plus de la pré-charge qui maintient le muscle à sa longueur de repos.
Plus la charge est élevée, plus la vitesse de contraction a tendance à diminuer.
La vitesse de contraction du muscle correspond à l'**Équation de Hill : V= (Po-P).b/p+a**



Po =max de Tension

développé par le muscle

P = pré et post charge

a = cte de vitesse

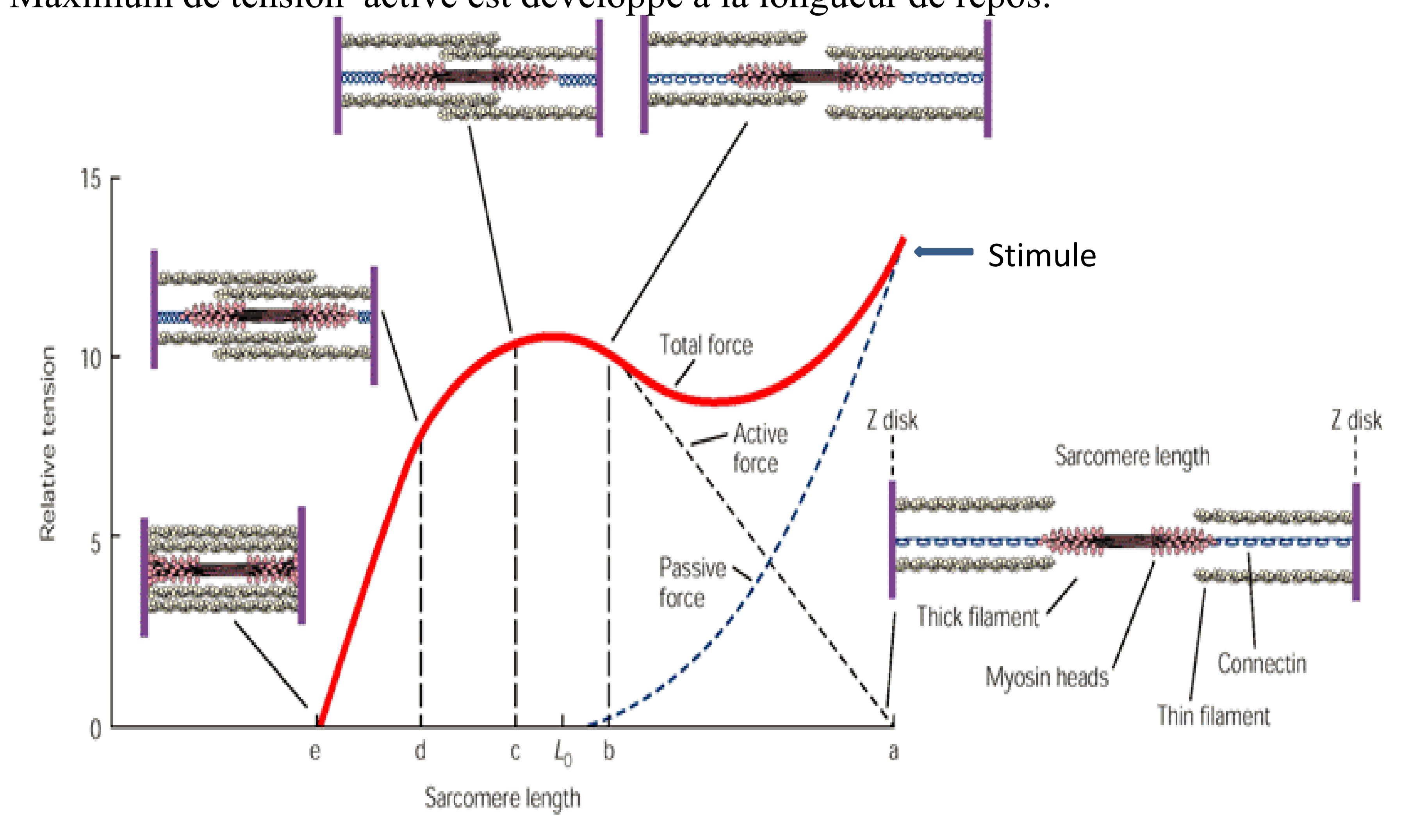
b= cte de force

RELATION TENSION –LONGUEUR

Force musculaire en fonction de la longueur initiale du sarcomère

La force active dépendra du degré de chevauchement entre filaments fin et épais

Maximum de tension active est développé à la longueur de repos:

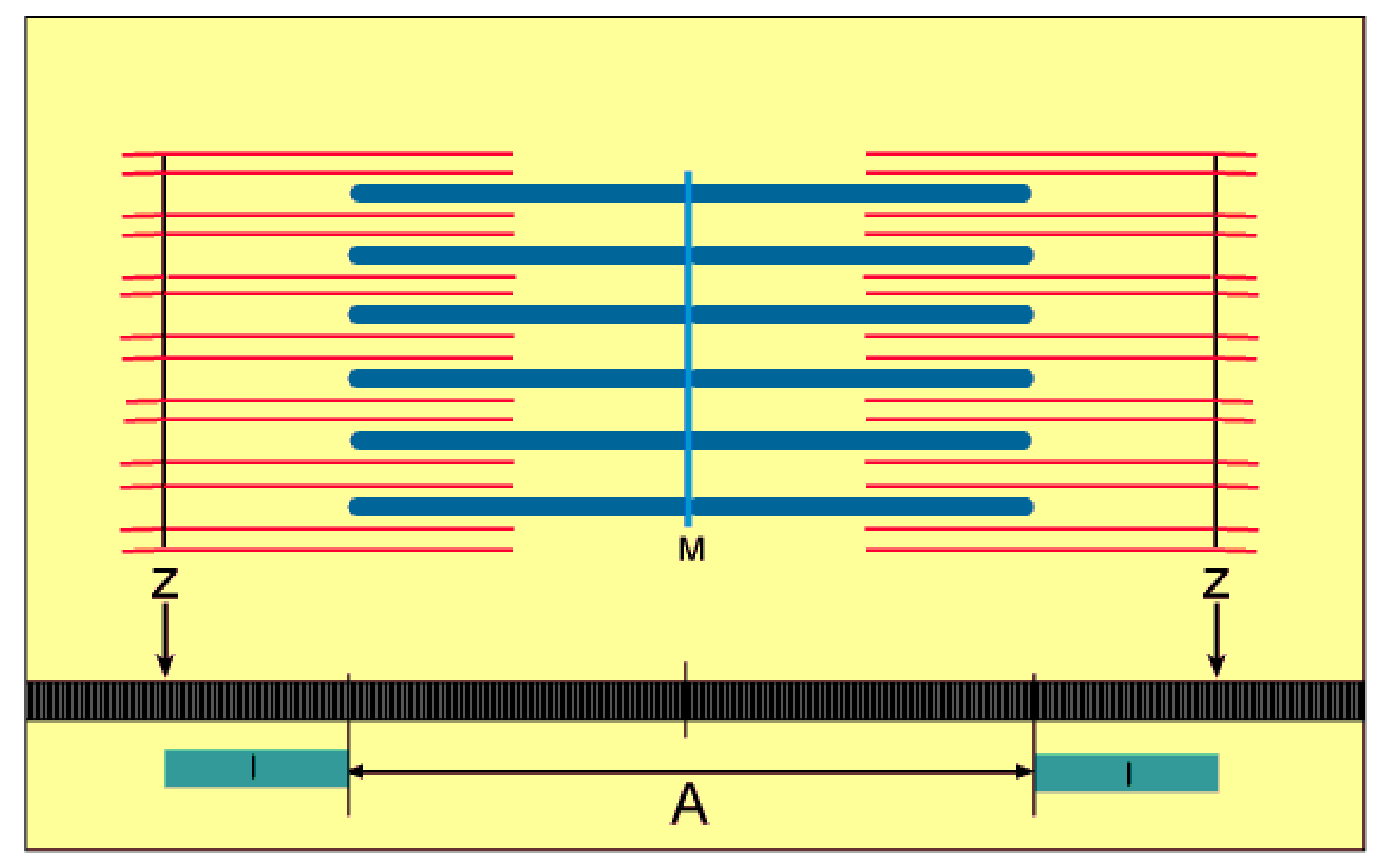


RELATION TENSION –LONGUEUR

Commentaire: La tension active développée par un muscle est maximale à sa longueur de repos (sarcomère ni étiré ni contracté mais relâché)

- Quand le sarcomère est étiré au-delà de la longueur de chevauchement des filaments fins et épais (longueur a) aucune force active n'est développée parce que les têtes de myosine ne sont pas à côté des sites (de couverture) donc empêche la formation de ponts (croisés).
- Quand les filaments chevauchent (longueur a-b) la force qui pourrait se développer augmente linéairement avec la décroissance du sarcomère;
- Autour de la longueur optimale du muscle (L0 entre la longueur b-c), le niveau de la force reste constant parce que la portion central des filaments épais ne contient pas de têtes de myosine.
- Au fur et à mesure que la longueur du sarcomère diminue le chevauchement des filaments fins entre eux entraine une diminution des zones de contacts entre filaments fins et épais d'ou une diminution de la force active(longueur c-d; d-e) .
- La force passive existe en dehors de toute activation, commence au pt (L0), augmente exponentiellement puis linéairement au fur et à mesure que le muscle s'allonge et que les filaments connecteurs (ceux qui lient les filaments épais aux stries z) s'allongent.
- Si on soumet un muscle à un étirement croissant et que l'on stimule ce muscle, le muscle présentera une tension totale qui sera la somme d'une tension passive et d'une tension active: CTT=CTP+CTA

Sarcomère: glissement des filaments épais et fins permettant leur chevauchement



V/ ASPECT ENERGETIQUE

La source d'énergie immédiate du muscle est représentée par l'ATP qui provient de plusieurs réactions:

- ADP+CP ⇄ ATP+C
- 2 ADP ⇄ ATP+AMP(réaction de LOHMANE)
- glycolyse anaérobie → acide lactique +3ATP
- glycolyse aérobie → CO_2 + H_2O + 38 ATP
- Aa,Glu,Lip → CO_2 + H_2O + nATP

-ATP =source d'énergie immédiate ;

-**Les hydrates de carbone dans les** premières minutes de l'exercice provenant du glycogène musculaire et du glycogène hépatique

-Les acides gras et l'acide acétoacétique provenant des triglycérides ensuite.

-Les acides aminés peuvent être utilisés mais dans une moindre proportion .

Énergétique de la contraction

Processus métaboliques :

Au nombre de 3 (voies métaboliques) :

– **Anaérobie alactique** : voie de la phosphocréatine (pas d'O2, pas de production d'acide lactique)– Réaction de Lohman

– **Anaérobie lactique** : voie de la glycolyse anaérobie (pas d'O2, production d'acide lactique)

– **Aérobie** : phosphorylation oxydative – O2 = accepteur final des ions H+

Source d'énergie immédiate : ATP

– Utilisation des différentes sources d'énergie:

- **Au début d'un travail musculaire**,

Les réserves d'ATP s'épuisent en quelques secondes, et peu après, celles de créatine phosphate.

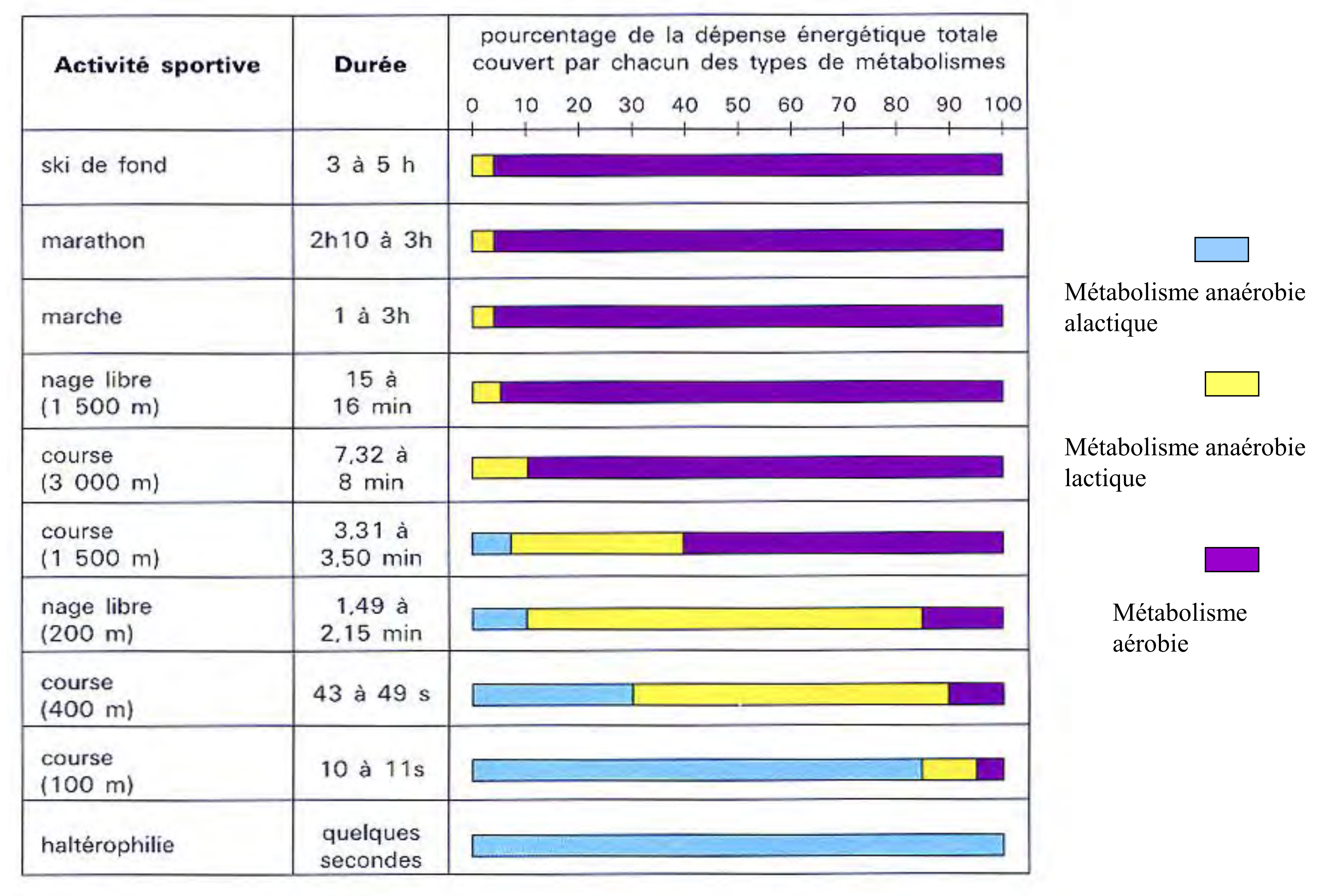
- la **glycolyse anaérobie**

atteint son maximum après environ **45** secondes,

- le **métabolisme aérobie**

met environ **2** minutes pour s'installer pleinement.

Voies de restauration de l’ATP

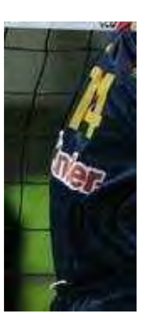


d’après Tavernier et Lizeaux, 1re S, Bordas




BULLS
23
SHARP
NBA




14

DETTE D'O2

Après l'effort une surconsommation d'o2 est nécessaire pour reconstituer les réserves énergétiques qui correspondent au déficit de l'offre observé durant l'effort ; elle comporte deux parties :

- la première partie dette alactique
précoce de la dette d'oxygène correspondant à la reconstitution du phosphagène (ATP ,CP) et aux réserves d'oxygène

- La deuxième partie: la dette lactique qui survient ensuite correspondant à l'élimination de l'acide lactique.
A noter la reconstitution du stock de glycogène s'effectuera avec des délais beaucoup plus longs

ASPECTS ENERGETIQUES

Les dérivés phosphatés libèrent durant la contraction musculaire de l'énergie qui sera transformé :

- En travail W=F.L (F = charge ; L= déplacement)

notion DE RENDEMENT : Wx100/ Énergie totale =20 à 25%

- En chaleur

Autres rôle de ATP: plasticité ,pompe ionique…

PHENOMENES THERMIQUES

La contraction musculaire s'accompagne d'une production de chaleur dans ses différentes phases:

CHALEUR INITIALE (HILL) : **une chaleur initiale faiblement influencée par l'oxygène, elle est subdivisée en**:

-Chaleur d'activation: maximale durant la période de latence, elle représente 65% de la production de chaleur lors d'une secousse, et correspond à la mise en activité des composantes contractiles(protéines).

-Chaleur de maintien : max lors du tétanos isométrique à la longueur de repos

-Chaleur de raccourcissement , d'allongement , relâchement ,

-Effet thermo élastique : comme tous les corps élastiques, le muscle s'échauffe a l'étirement et se refroidit au relâchement.

CHALEUR RETARDEE : **chaleur aérobie : accompagne les processus métaboliques de remise en état du muscle dans les conditions initiales**

Conclusion

- Le muscle squelettique est un organe spécialisé dans le développement d'une force sous le contrôle étroit du système nerveux.
- Sous une apparente et trompeuse homogénéité de structure, la population des muscles squelettiques s'avère être très hétérogène, Certains muscles sont en effet capables de contractions très rapides de courte durée et puissantes, tandis que d'autres développent des contractions lentes, de longues durée, mais peu puissantes.

MERCI